

Customer No.	026418	
IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE		
Attorney's Docket No.:	GK-EIS-1102/500593.20095	
U.S. Application No.:		
International Application No.:	PCT/EP2004/008217	
International Filing Date:	JULY 23, 2004	23 JULY 2004
Priority Date Claimed:	JULY 25, 2003	25 JULY 2003
Title of Invention:	METHOD AND APPARATUS FOR THE DIGITIZATION OF AND FOR THE DATA COMPRESSION OF ANALOG SIGNAL	
Applicant(s) for (DO/EO/US):	Axel HAUPT, Volker SCHMITT, Johannes HUBER and Bernd MATSCHKAL	

GERMAN APPLICATION TEXT AS FILED

Sennheiser electronic GmbH & Co. KG
Am Labor 1, 30900 Wedemark

Verfahren und Vorrichtung zur Digitalisierung sowie zur Datenkomprimierung analoger Signale

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur Digitalisierung analoger Signale und ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur Datenkomprimierung analoger Signale.

Viele Bereiche der digitalen Nachrichtenübertragung haben das gemeinsame
5 Ziel, ein zunächst analog vorliegendes Quellensignal (Messwerterfassung, Audiosignalverarbeitung in Studioqualität, usw.) unter Ausnutzung der Vorteile der digitalen Übertragung zu einem Empfänger zu transportieren, um es dort in Form eines analogen Ausgangssignals wiederzugeben. Hierfür muss das Analogsignal zum einen digitalisiert bzw. quantisiert werden, zum anderen
10 muss eine entsprechende Datenkompression erfolgen, um das Signal bei möglichst guter Qualität über ein digitales Übertragungssystem mit begrenzter Rate zu übertragen. Nach einer PCM-Encodierung werden üblicherweise Verfahren zur Datenkompression angewendet, die Redundanz innerhalb des Quellensignals sowie Irrelevanz bzgl. spezieller Eigenschaften des
15 Konsumenten des Signals ausnutzen. Die zahlreichen bereits existierenden Verfahren zur Digitalisierung analoger Quellensignale verfolgen teilweise

grundsätzlich verschiedene Ansätze, sie alle lassen sich jedoch in zwei Hauptkategorien einteilen:

- 5 i) Verfahren, bei denen die rekonstruierte Wellenform die ursprüngliche Wellenform sehr nahe approximiert, d.h. es erfolgt keine Ausnutzung von Irrelevanz. Wir verwenden hier den Begriff „wellenformerhaltend“ anstelle des oft angewendeten Begriffs „verlustlos“ in Bezug auf die Wellenformcodierung, da die Digitalisierung eines analogen Signals bei einer begrenzten Datenrate prinzipiell nicht „verlustlos“ ist (d.h. unendliche Entropie einer kontinuierlichen Zufallsvariable).
- 10 ii) Nicht wellenformerhaltende Verfahren. Sie sind beispielsweise im Audibereich von entscheidender Bedeutung, da hier oftmals nur der subjektive Höreindruck am Empfängeranfang entscheidend ist (z.B. Ausnutzung psychoakustischer Maskierungseffekte). Hier spielen Wellenformveränderungen (Amplituden- und Phasenverzerrungen), die das
15 Signal durch Quantisierung und Komprimierung erfährt, i.d.R. nur eine untergeordnete Rolle. Üblicherweise führt eine Signalverarbeitung unter Ausnutzung von Irrelevanz zu einer rekonstruierten Wellenform, die sich sehr stark von der ursprünglichen Wellenform unterscheidet und zudem oft mit einer großen Signalverzögerung behaftet ist (z.B. aufgrund von
20 Spektraltransformationen oder äquivalenten blockbasierten Methoden). Die Übertragungsqualität eines solchen Verfahrens lässt sich nicht durch einen Störabstand $10 \log_{10}(\text{SNR})$, SNR: Signal to Noise Ratio, im klassischen Sinne messen; sie muss vielmehr durch aufwendige Hörtests mit trainierten Personen ermittelt werden. Für viele Anwendungsbereiche (z.B. in der
25 Messtechnik, Aufzeichnung von Wellenformen für eine weitere Signalverarbeitung zu einem späteren Zeitpunkt, Echtzeit-Signalübertragung unter Anwendung digitaler Modulationsverfahren, die keine nennenswerte Signalverzögerung zulassen z.B. für drahtlose digitale Bühnenmikrophone) sind derartige Signalcodierungsverfahren jedoch gänzlich unbrauchbar.

Es ist somit Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Digitalisieren sowie zum Komprimieren analoger Signale mit verbesserter Qualität vorzusehen.

5 Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren zum Digitalisieren analoger Signale gemäß Anspruch 1, durch eine Vorrichtung zum Digitalisieren analoger Signale gemäß Anspruch 12, durch ein Verfahren zum Komprimieren analoger Signale gemäß Anspruch 8 und eine Vorrichtung zum Komprimieren analoger Signale gemäß Anspruch 17 gelöst.

10 Somit wird ein Verfahren zur Digitalisierung analoger Quellensignale vorgesehen, bei dem eine D -dimensionale sphärisch logarithmische Quantisierung der analogen Quellensignale erfolgt.

15 Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ebenfalls ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zum Komprimieren analoger Quellensignale vorgesehen, bei dem eine Digitalisierung analoger Quellensignale gemäß dem oben beschriebenen Verfahren erfolgt und wobei eine differenzielle Pulscodemodulation durchgeführt wird.

20 Somit wird ein wellenformerhaltendes Verfahren vorgesehen, welches die folgenden Anforderungen erfüllt: a) geringe Datenrate durch Ausnutzung von günstigen Packungseigenschaften mehrdimensionaler Gitter (Vektorquantisierung) sowie Ausnutzung von Abhängigkeiten in der Folge der Abtastwerte aus dem Quellensignal, b) extrem hoher Dynamikbereich, d.h. das SNR ist konstant über einen sehr großen Aussteuerbereich von z.B. 60 dB und mehr bzgl. der Kurzzeitvarianz eines analogen Quellensignals, c) hoher segmentweiser objektiv messbarer Störabstand für kurze Segmente
25 von Abtastwerten, vorzugsweise im Sinne des Verhältnisses von Varianz des Nutzsignals zum mittleren quadratischen Fehler, d) Unempfindlichkeit gegenüber speziellen Signalparametern wie z.B. segmentweise Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion usw. und am wichtigsten e) Einführung

einer extrem geringen Signalverzögerung in der Größenordnung weniger (bis zu 10) Abtastperioden.

- Die Erfindung beruht auf dem Gedanken, ein Verfahren zur hochauflösenden, wellenformerhaltenden Digitalisierung analoger Signale vorzusehen, wobei die
- 5 übliche skalare logarithmische Quantisierung auf mehrdimensionale Kugelkoordinaten übertragen wird und sich somit die hieraus resultierenden Vorteile wie z.B. ein konstanter Störabstand über einen extrem hohen Dynamikbereich bei einem sehr geringen Verlust in Bezug auf die Rate-Distortion-Theorie ergeben. Um die im Quellensignal vorhandenen
- 10 statistischen Abhängigkeiten für einen weiteren Störabstandsgewinn ausnutzen zu können, wird die Differentielle Pulscodemodulation (DPCM) mit sphärisch logarithmischer Quantisierung kombiniert. Das resultierende Verfahren erzielt eine wirksame Datenreduktion mit einem hohen Langzeit- sowie Kurzzeitstörabstand bei extrem geringer Signalverzögerung.
- 15 Weitere Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Die Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die beigefügte Zeichnung näher erläutert.

- Figur 1 zeigt eine Darstellung der Proportionalität eines Kreisbogensegmentes zum Radius,
- 20 Figur 2 zeigt ein Diagramm zur Veranschaulichung der Anzahl von Quantisierungszellen, die einem Radius zugeordnet sind, normalisiert auf die Zellenanzahl pro Absolutbetrag eines Abtastwertes in skalarer Quantisierung,
- Figur 3 zeigt einen Graphen zur Veranschaulichung eines
- 25 Störabstandsverlustes bei verschiedenen A - Werten,
- Figur 4 zeigt einen Graphen zur Veranschaulichung des Störabstandes gemäß der vorliegenden Erfindung,
- Figur 5 zeigt ein Blockschaltbild eines DPCM-Encoder mit Rückwärtsprädiktion gemäß der vorliegenden Erfindung,

Figur 6 zeigt einen Graphen zur Veranschaulichung des Signal-Rauschabstandes gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung, und

Figur 7 zeigt Graphen der Signalpegel und des Signal-Rauschabstandes gemäß dem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung.

Das Ziel der logarithmischen Quantisierung ist eine hohe Dynamik des Quantisierers, also ein weiter Bereich des mittleren Signalpegels, in welchem das SNR und somit der maximale relative Quantisierungsfehler

$$\frac{\Delta q_i / 2}{r_i}$$

konstant ist. Hierbei bezeichnet Δq_i die Breite des i -ten Quantisierungsintervalles und r_i den jeweiligen Rekonstruktionswert. Diese Aufgabe führt zu der logarithmischen Quantisierung z.B. im Sinne des A -Laws gemäß K. Tröndle, R. Weiß. Einführung in die Pulscodemodulation. Oldenbourg Verlag, Munich, 1974. Für den Bereich mittlerer Aussteuerung ergibt sich für $R \gg 1$ folgender Störabstand gemäß N. S. Jayant, P. Noll. Digital Coding of Waveforms. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.

$$10 \log_{10}(\text{SNR}) = R \cdot 6,02 \text{dB} + 10 \log_{10} \frac{3}{(1 + \ln(A))^2}, \quad (1)$$

wobei R die mittlere Rate der Quantisierung (bit/Abtastwert) bezeichnet und A den üblichen Parameter der logarithmischen Quantisierung darstellt; d.h. der maximale relative Fehler ist für Abtastwerte mit einem Betrag $> 1/A$ (bezogen auf einen Signalbereich der Quantisierung von -1 bis $+1$) konstant. Damit wird ab einem mittleren Signalpegel des Quellensignals von

$$-B_1 := 20 \log_{10}(1/A) \text{ dB} \quad (2)$$

ein Störabstand gemäß (1) erreicht. Der Wert B_1 charakterisiert damit den Dynamikbereich der logarithmischen Quantisierung. Innerhalb dieses Dynamikbereiches ist der Störabstand zudem gänzlich unabhängig von der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) des Quellensignals, so dass das Verfahren universell einsetzbar ist. Allerdings stellt der Term $10 \log_{10}(3/(1 + \ln(A))^2)$ im Vergleich zu einer gleichmäßigen Quantisierung bei Vollaussteuerung durch ein gleichverteiltes Signal gewissermaßen einen "Störabstands-Verlust" durch Kompondierung dar, der für einen großen Dynamikbereich zu bezahlen ist.

Nachfolgend wird eine Quantisierung in Kugelkoordinaten in D Dimensionen beschrieben.

Die Sphärisch logarithmische Quantisierung gehört zur Familie der Vektorquantisierungsverfahren (von z.B. R. M. Gray, David L. Neuhoff. Quantization. *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 2325-2383, Oct. 1998, Manfred Herbert. Lattice-Quantisierung von Sprach- und Sprachmodellsignalen. Ausgewählte Arbeiten über Nachrichtensysteme, Nr. 79, Editor: H.-W. Schüßler, Erlangen 1991). Durch eine kugeldichte Packung in vielen Dimensionen können beträchtliche Störabstandsgewinne bei der Quantisierung erzielt werden, auch wenn keine statistischen Abhängigkeiten innerhalb der Signale ausgenutzt werden können. Bei sphärischer Quantisierung wird ein Vektor $x := (x_1, \dots, x_D)$ mit D Abtastwerten in kartesischen Koordinaten durch Polarkoordinaten $u := (\varphi_1, \dots, \varphi_{D-1}, r)$ ausgedrückt. Die $D - 1$ Winkel φ_i sowie der Radius r sind durch folgende Gleichungen gegeben (j : imaginäre Einheit, $\arg(\cdot)$: Argumentfunktion, welche den Winkel einer komplexen Zahl im Bogenmaß angibt):

$$\varphi_1 = \arg(x_1 + jx_2) \in [-\pi, +\pi) \quad (3)$$

$$\varphi_i = \arg\left(\sqrt{\sum_{l=1}^i x_l^2} + jx_{i+1}\right) \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right], \quad (4)$$

$$i \in \{2, \dots, D-1\}.$$

$$r^2 = \sum_{l=1}^D x_l^2 \quad (5)$$

Die Rekonstruktion der kartesischen Komponenten aus dem Vektor u erfolgt
5 hieraus gemäß

$$x_i = r \cdot b_{i-1} \cdot \sin(\varphi_{i-1}), \quad i \in \{D, \dots, 2\} \quad (6)$$

$$x_1 = r \cdot b_1 \cdot \cos(\varphi_1) = r \cdot b_0, \quad (7)$$

mit den Radien b_i der "Breitenkreise" der Einheitskugel (Radius 1):

$$b_{D-1} = 1, \quad (8)$$

$$b_i = 1 \cdot \prod_{l=i+1}^{D-1} \cos(\varphi_l), \quad i \in \{D-2, \dots, 0\}. \quad (9)$$

Damit ist ausgehend von φ_{D-1} eine aufwandsgünstige rekursive Darstellung
10 gefunden. Eine effiziente Implementierung von Vor- und Rücktransformation
ist mit Hilfe des sog. CORDIC-Algorithmus (welcher in Volder, Jack. The
CORDIC Trigonometric Computing Technique. *IRE Trans. Electronic
Computing*, Vol EC-8, pp. 330-334, Sept. 1959 beschrieben ist) mit geringer
Komplexität möglich.

15 Nachfolgend wird die Sphärisch logarithmische Quantisierung beschrieben:

Damit bei der Quantisierung in Polarkoordinaten die Vorteile der logarithmischen Quantisierung, d.h. die Unabhängigkeit des SNR von der WDF des Quellensignals, weiterhin genutzt werden können, wird nun der Betrag (Radius) logarithmisch gemäß den Vorschriften des A -Law quantisiert.

- 5 Die Winkel φ_i werden individuell gleichmäßig quantisiert, jeweils mit Wahl der Quantisierungsintervalle in Abhängigkeit der bereits quantisierten Winkel

- $\hat{\varphi}_l, l \in \{i + 1, i + 2, \dots, D - 1\}$ höherer Ordnungen, wie sie auch für die Rekonstruktion verwendet werden. Somit wird eine sehr einfache Implementierung der Quantisierung und der Signalrekonstruktion erzielt, wobei durch die iterative Vorgehensweise gemäß (3) bis (9) eine schrittweise Verarbeitung der einzelnen Koordinaten wie im Fall skalarer Quantisierung bewahrt wird.

- Aufgrund der Proportionalität der Länge eines Kreisbogensegmentes zum Radius sind die Anforderungen an die logarithmische Quantisierung, d.h. die Proportionalität der Größe eines Quantisierungsintervalls zum Signalwert, bereits für gleichmäßige Quantisierung der Winkel erfüllt. Fig. 1 zeigt ein einfaches Beispiel für zwei Dimensionen $D = 2$. Der zweite Term in (1) muss somit nur für eine der insgesamt D Dimensionen bezahlt werden, hierin liegt die wesentliche Ursache für die Gewinne mittels sphärisch logarithmischer Quantisierung.

- Um die Implementierung der Quantisierung in Kugelkoordinaten zu vereinfachen, gehen wir von näherungsweise kubischen Quantisierungszellen aus, d.h. die Oberfläche einer D -dimensionalen Kugel mit Radius 1 wird durch ein Netz aus $D - 1$ -dimensionalen (Hyper-)Würfeln quantisiert. Wie nachfolgend gezeigt wird, ergibt sich durch diese suboptimale Quantisierung der Kugeloberfläche im Vergleich zu einem optimal dicht gepackten Gitter jedoch im Grenzwert $D \rightarrow \infty$ lediglich ein Verlust von

$$10 \log_{10} \left(\frac{\pi e}{6} \right) = 1,53 \text{ dB},$$

also ein Ratenverlust von ca. 1/4 bit/Abtastwert, der zugunsten einfacher Implementierbarkeit hingenommen wird.

Im folgenden wird beschrieben, wie die Aufteilung der M^D (d.h. $M := 2^R$) pro Quantisierungsschritt zur Verfügung stehenden Quantisierungsstufen auf die
 5 einzelnen Quantisierungsintervalle für den Radius und die Oberfläche der D –
 dimensionalen Einheits(hyper-)kugel in optimaler Weise vorgenommen wird.

Für den logarithmischen Bereich

$$\frac{r_0}{A} \leq r \leq r_0$$

der A -Law-Vorschrift gelte wie üblich die folgende Kompressorkennlinie

$$10 \quad k(r) = r_0 \cdot \left(c \cdot \ln \frac{r}{r_0} + 1 \right) \quad \text{mit} \quad c := \frac{1}{1 + \ln A} \quad (10)$$

Für deren Ableitung gilt:

$$k'(r) := \frac{dk(r)}{dr} = \frac{c \cdot r_0}{r}. \quad (11)$$

A bezeichnet den freien Parameter des A -Law und r_0 wird als noch näher zu beschreibender Normierungsfaktor für den Radius eingeführt. Mit M_D
 15 Quantisierungsintervallen für den Radius (D -te Komponente des Vektors u) ergibt sich für die Breite der Quantisierungszelle in Richtung des Radius

$$\Delta r(r) \approx \frac{r_0}{M_D \cdot k'(r)} = \frac{1}{M_D \cdot c} \cdot r. \quad (12)$$

Man beachte, dass $\Delta r(r)$ im betrachteten Bereich unabhängig von r_0 ist.

Um bei der Quantisierung in Polarkoordinaten ein ähnliches Übersteuerungsverhalten zu erhalten wie bei kartesischen Koordinaten, wird der Maximalwert r_0 für den Radius derart normiert, dass die somit entstehende

5 D -dimensionale Kugel das gleiche Volumen besitzt wie ein D -dimensionaler Würfel der Kantenlänge 2 (entsprechend einem Quantisierungsbereich $x_i \in [-1;1]$ in jeder Dimension), d. h. $V_{\text{Kugel}} \stackrel{!}{=} V_{\text{Würfel}}$:

$$\alpha_D \cdot r_0^D \stackrel{!}{=} 2^D$$

mit dem Volumen α_D der D -dimensionalen Einheitskugel gemäß J. H.

10 Conway and N. J. A. Sloane. Sphere Packings, Lattices, and Groups. Springer-Verlag, 3rd édition.

$$\alpha_D = \frac{\pi^{D/2}}{(D/2)!} \quad (13)$$

Damit gilt:

$$r_0 = \frac{2}{\alpha_D^{1/D}} \quad \text{mit} \quad r_0 > 1 \quad \forall D \in \mathbb{N} \quad (14)$$

15 Um die Bestimmung des resultierenden Störabstandes zu vereinfachen, wird im Folgenden $r = 1$ gesetzt, d.h. es werden diejenigen Quantisierungszellen betrachtet, welche auf der Oberfläche einer Kugel mit Einheitsradius liegen. Dies ist ohne Beschränkung der Allgemeinheit möglich, da das SNR aufgrund der logarithmischen Quantisierung im Bereich

$$\frac{r_0}{A} \leq r \leq r_0$$

unabhängig vom Radius ist. Für die Breite der Quantisierungszellen erhält man nun

$$\Delta := \frac{1}{M_D \cdot c} . \quad (15)$$

- 5 Durch die bereits angesprochene gleichmäßige Winkelquantisierung wird die Oberfläche der D -dimensionalen Einheitskugel in M_φ Zellen eingeteilt, welche jeweils die Form von $D - 1$ -dimensionalen Würfeln besitzen. Für die Oberfläche dieser $D - 1$ -dimensionalen Kugel gilt gemäß J. H. Conway and N. J. A. Sloane. Sphere Packings, Lattices, and Groups. Springer-Verlag, 3rd
10 edition:

$$S = \beta_D \cdot r^{D-1} \quad \text{mit} \quad \beta_D = D \cdot \alpha_D . \quad (16)$$

Nachfolgend wird die Aufteilung der Quantisierungsstufen auf Radius und Winkel beschrieben.

- Für eine faire Aufteilung der M^D zur Verfügung stehenden
15 Quantisierungszellen auf Radius und Oberfläche der Einheitskugel gelten die folgenden Überlegungen: im Hinblick auf die Approximation durch kubische Quantisierungszellen, d.h. ungefähr gleiche Abmessungen der Quantisierungszellen in allen Dimensionen (Radius und Kreisbogensegmente), muss die Oberfläche der Einheitskugel ($r = 1$) in M_φ
20 gleiche $(D - 1)$ -dimensionale Würfel mit identischer Kantenlänge Δ unterteilt werden:

$$S = \beta_D = M_\varphi \cdot \Delta^{D-1}. \quad (17)$$

Da $M = 2^R$ Intervalle pro Abtastwert zur Verfügung stehen, muss zusätzlich

$$M_\varphi \cdot M_D = M^D \quad (18)$$

gefordert werden.

- 5 Mit (15), (17) und (18) erhält man für die Anzahl der für die Quantisierung des Radius zur Verfügung stehenden Quantisierungsintervalle

$$M_D := M \cdot \frac{1}{\beta_D^{1/D}} \frac{1}{c^{(D-1)/D}}. \quad (19)$$

- In Fig. 2 sind die Quotienten $M_D / (M / 2)$ der Anzahl an Quantisierungszellen, die dem Radius gewidmet sind, normalisiert auf die Zellenanzahl pro Absolutbetrag eines Abtastwertes in skalarer Quantisierung ($D = 1$), gegenüber der Dimensionszahl für mehrere Beispiele des Parameters A der A -Law-Kompondierung aufgetragen. Die Werte von A sind derart gewählt, dass die Anwendung der A -Law-Kompondierung zu kleinsten Quantisierungsintervallen führt, die um den Faktor
- 15 $2^{\Delta n}$, $\Delta n \in \mathbb{N}$ kleiner sind, als dies bei gleichmäßiger Quantisierung bei identischer Gesamtintervallzahl der Fall wäre:

$$\Delta r(r \leq 1/A) = 2^{-\Delta n} \cdot \frac{1}{M_D}, \text{ d. h.} \quad (20)$$

$$2^{\Delta n} = \frac{A}{1 + \ln A} \quad (21)$$

Demzufolge ist die Auflösung für kleine Werte von r um Δn bit erhöht.

Fig. 2 zeigt, dass sphärisch logarithmische Quantisierung bis über den Faktor 8 hinaus mehr Intervalle dem Radius zuordnet, als eine skalare Quantisierung mit einer äquivalenten Auflösung im Bereich sehr kleiner Signalwerte. Daher wird ein Gewinn von 3 bit/Abtastwert oder 18 dB für sphärisch logarithmische Quantisierung in diesem Bereich erreicht.

Unter Verwendung von (15) erhält man die Kantenlänge der Quantisierungszellen auf der Oberfläche der Einheitskugel:

$$\Delta = \frac{1}{M} \cdot \left(\frac{\beta_D}{c} \right)^{\frac{1}{D}} \quad (22)$$

Die Konstante c ist durch den gewählten Dynamikbereich bestimmt, siehe (2) und (10).

Die aktuelle gleichmäßige Quantisierung der Winkelvariablen für gleiche Kreisbogensegmente auf der Einheitskugel erhält man mit Hilfe der rekursiven Gleichungen (8) und (9). Wir haben M_i Intervalle für die Koordinate φ_i zur Verfügung:

$$M_{D-1} = \left\lfloor \frac{\pi}{\Delta} \right\rfloor \quad (23)$$

$$M_i(\hat{\varphi}_{i+1}, \dots, \hat{\varphi}_{D-1}) = \left\lfloor \frac{\pi \cdot \hat{b}_i}{\Delta} \right\rfloor \quad (24)$$

für $i \in \{D-2, D-3, \dots, 2\}$

$$M_i(\hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_{D-1}) = \left\lfloor \frac{2\pi \cdot \hat{b}_i}{\Delta} \right\rfloor \quad (25)$$

mit $\lfloor x \rfloor \in \mathbb{N}$: größte ganze Zahl $\leq x$ mit $x \in \mathbb{R}^+$ und \hat{b}_i entsprechend (8) und (9) für quantisierte Winkel $\hat{\phi}_i$.

- 5 Es gilt zu beachten, dass die Anzahl M_i der Quantisierungsintervalle in der Dimension i eine Funktion der in den Dimensionen $i+1, \dots, D-1$ ausgewählten Quantisierungszelle ist und daher ausgehend von M_{D-1} iterativ berechnet werden kann. Eine Berechnung im Voraus ist nicht möglich.

- 10 Die Zuordnung eines Indexes $N \in \{0, 1, \dots, M^D - 1\}$ zu der aktuellen Quantisierungszelle sowie die Rekonstruktion kann durch Anwendung verketteter Lookup-Tabellen, wie sie aus dem Shell Mapping, z.B. gemäß Robert F. H. Fischer. Precoding and Signal Shaping for Digital Transmission, pp. 258-281, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002. ISBN 0471 22410 3 bekannt sind, durchgeführt werden:

- 15 Die Zuordnung eines Indexes zum Radius ist unabhängig vom Zellenindex auf der Einheitskugel, somit kann nunmehr das Problem der Indexzuordnung für die Oberfläche der Einheitskugel betrachtet werden.

- 20 Die Startnummer des Indexes ist 0, die maximale Endnummer des Indexes ist $M_\varphi - 1$, entsprechend der Anzahl an Quantisierungszellen auf der Oberfläche der Einheitskugel. M_{D-1} ist die Anzahl der Unterkugeln der Dimensionalität $D-1$ und kann aus (23) berechnet werden. Zugunsten einer schnellen Implementierung wird eine Lookup-Tabelle erster Ordnung mit M_{D-1} Einträgen $N_0, \dots, N_{M_{D-1}-1}$ verwendet. Hierbei bezeichnet N_i den kleinsten Index aller Zellen,

die zu dem i -ten Quantisierungsintervall für den Winkel $\hat{\phi}_{D-1}$ gehören:

$$N_0 = 0 \quad (26)$$

$$N_{i+1} = \sum_{v=0}^i M_{D-2} \left(\hat{\phi}_{D-1} = v \cdot \frac{\pi}{\Delta} \right),$$

$$i \in \{0, \dots, (M_{D-1} - 2)\}$$

- 5 Somit existieren $N_{i+1} - N_i$ Zellen für einen festgesetzten i -ten Wert von $\hat{\phi}_{D-1}$. Für jedes N_i wird eine Lookup-Tabelle zweiter Ordnung angelegt, welche die Indizes O_{ij} enthält, die wiederum den kleinsten Index aller Zellen des j -ten Quantisierungsintervalls für den Winkel $\hat{\phi}_{D-2}$ innerhalb der $D - 1$ -dimensionalen Unterkugel bezeichnen, auf die N_i sich bezieht.

$$10 \quad O_{i,0} = 0 \quad (27)$$

$$O_{i,j+1} = \sum_{v=0}^j M_{D-3} \left(\hat{\phi}_{D-2} = v \cdot \frac{\pi}{\Delta}, \hat{\phi}_{D-1} = i \cdot \frac{\pi}{\Delta} \right),$$

$$i \in \{0, \dots, (M_{D-1} - 1)\}.$$

$$j \in \left\{ 0, \dots, \left(M_{D-2} \left(\hat{\phi}_{D-1} = i \cdot \frac{\pi}{\Delta} \right) - 2 \right) \right\}$$

- 15 Diese Vorgehensweise führt zu $D - 2$ Ordnungen von verketteten Lookup-Tabellen, um die $D - 1$ Winkel zu indizieren (die Lookup-Tabelle der Ordnung $D - 1$ für den Winkel $\hat{\phi}_1$ würde aufeinanderfolgende Zellenindizes enthalten und muss deshalb nicht tabellarisiert werden).

Nachfolgend wird das Quantisierungsgeräusch und der Störabstand näher betrachtet.

Solange eine ausreichend große Anzahl an Quantisierungszellen in D Dimensionen vorliegt, darf die übliche Approximation eines gleichverteilten Quantisierungsfehlers innerhalb dieser kubischen Zellen angewendet werden, wobei jede Zelle durch ihren Mittelpunkt repräsentiert wird. Für die Leistung des Quantisierungsgeräusches gilt näherungsweise

$$\frac{\Delta^2}{12} \cdot D. \quad (28)$$

Die sphärisch logarithmische Quantisierung erzwingt $\Delta(r) = \Delta \cdot r$ in allen Dimensionen für $\frac{r_0}{A} \leq r \leq r_0$, daher gilt

$$\text{SNR} = \frac{r^2}{\Delta^2 \cdot r^2 \cdot \frac{D}{12}} = F(D) \cdot M^2 \quad (29)$$

$$\text{mit } F(D) := \frac{12}{D} \cdot \left(\frac{c}{\beta_D} \right)^{\frac{2}{D}}, \quad (30)$$

siehe auch (22). Wie gewünscht ist das SNR unabhängig von der Varianz des Signals in diesem Bereich.

Durch Einsetzen von (13) und (16) erhält man:

$$F(D) = \frac{12}{\pi} \cdot \frac{1}{D^{\frac{D+2}{D}}} \cdot ((D/2)!)^{2/D} \cdot c^{2/D}. \quad (31)$$

Betrachtet man (29), so kann $F(D)$ als Verlust bezüglich der Rate-Distortion-Schranke für i.i.d. gauß'sche Zufallsvariablen (6 dB-pro-Bit-Regel) interpretiert werden. Dieser Zusammenhang ist in Fig. 3 für verschiedene Werte von A dargestellt.

5 Mit Hilfe der Stirlingschen Näherung

$$x! \approx \sqrt{2\pi x} \left(\frac{x}{e}\right)^x$$

lässt sich der Grenzwert

$$\lim_{D \rightarrow \infty} F(D) = \frac{6}{\pi e} \hat{=} -1,53 \text{ dB} \quad (32)$$

berechnen, der den Verlust gegenüber der Rate-Distortion-Schranke
10 darstellt, welcher durch die suboptimalen kubischen Quantisierungszellen
(gegenüber $(D - 1)$ -dimensionalen Hyperkugeln für die Quantisierung der
Oberfläche einer D -dimensionalen Einheitskugel und $D \rightarrow \infty$) verursacht
wird. Mit anderen Worten: Durch sphärisch logarithmische Quantisierung ist
es möglich, den in (1) beschriebenen Verlust infolge der Kompondierung bis
15 auf lediglich 1,53 dB wieder zu kompensieren. Somit ist es durch die Wahl
des Parameters A und D theoretisch möglich, einen beliebig großen
Dynamikbereich (Bereich konstanten Störabstandes über dem mittleren
Signalpegel) zu erzielen, ohne nennenswerte Verluste im maximal
erzielbaren Störabstand in Kauf nehmen zu müssen. Der asymptotische
20 SNR-Verlust von 1,53 dB entspricht einem Ratenverlust von 1/4
bit/Abtastwert, der zugunsten einer extremen Reduzierung der Komplexität
akzeptiert werden kann.

Da im Sinne der Zielsetzung einer logarithmischen Kompondierung bewusst
von keiner Kenntnis einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für i.i.d.
25 Quellensignalwerte ausgegangen wird, stellt aber wiederum die Rate-

Distortion-Funktion für die gauß'sche Zufallsvariable die untere Schranke für die erreichbare Rate (bzw. Verzerrung) bei gegebener Verzerrung (bzw. Rate) dar (Berger's upper bound der Rate-Distortion-Function gemäß T. Berger. Lossy Source Coding. *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 2693-2723, Oct. 1998). Somit sind unter den hier gestellten Anforderungen und Einschränkungen über 1,53 dB bzw. 1/4 bit/Abtastwert hinausgehende Verbesserungen ohnehin nicht mehr möglich.

Fig. 4 zeigt als Beispiel den Abstand des Störabstandes von der Rate-Distortion-Schranke $R \cdot 6\text{dB}$ abhängig vom mittleren Signalpegel ($10 \log_{10}$ (Varianz)) i.i.d. gaußverteilter Zufallsvariablen bei $A = 48270$ für unterschiedliche Dimensionszahlen der sphärisch logarithmischen Quantisierung. Diese Simulationsergebnisse erfüllen exakt die theoretische Analyse gemäß Fig. 3. Auf den ersten Blick scheinen die sehr großen Werte für A , wie sie in den Beispielen der Fig. 3 und 4 sowie in den nachfolgenden Beispielen verwendet werden, unrealistisch und nicht implementierbar. Es gilt hier jedoch zu beachten, dass gewöhnlich wesentlich mehr als M Intervalle mittels (19) für die Quantisierung des Radius ($M_D > M/2$) verwendet werden, siehe Fig. 2. Selbst für sehr niedrige Raten, z.B. $R = 4$ bit/Abtastwert existieren somit sehr feine Quantisierungsintervalle für den Radius. Darüber hinaus stellt (10) eine invertierbare Funktion für jeden Wert von $A > 1$ dar und ist somit in jedem Fall sehr gut für die Spezifizierung eines bestimmten nichtgleichmäßigen Quantisierers geeignet. Vorzugsweise sollte dieser Ansatz für echte Wellenformcodierung bei extrem geringer Signalverzögerung nicht für Raten unter 3 bit/Abtastwert angewendet werden.

Darüber hinaus wird in Fig. 4 deutlich, dass durch zwei Effekte mit wachsender Dimensionszahl bei konstantem Parameter A der Dynamikbereich stark ansteigt. Zum einen nimmt der Normierungsradius r_0 zu, zum anderen wirkt die Begrenzung der logarithmischen Kompression nur auf eine Dimension, auf den Radius, während für $D - 1$ Dimensionen die Proportionalität der Ausdehnung der Quantisierungszelle zum Signalwert

(=Bogenlänge zu Radius bei fixer Winkeldifferenz) auch für kleinste Signalwerte erhalten bleibt. Somit erweitert sich der Dynamikbereich in D Dimensionen näherungsweise auf

$$B_D \approx B_1 + 20 \log_{10}(r_0) + 10 \log_{10}(D). \quad (33)$$

- 5 Zudem steigt aufgrund des Mittelungseffektes innerhalb von jeweils D Werten die Übersteuerungsfestigkeit, wodurch eine weitere Vergrößerung des Dynamikbereiches erzielt wird. Im Grenzwert ($D \rightarrow \infty$) ergibt sich ein unendlich großer Dynamikbereich für jeden beliebigen Wert von A .

- Die strukturbedingte Verzögerung von sphärisch logarithmischer
10 Quantisierung beträgt, wie für jede Vektorquantisierungsmethode, exakt D Abtastwerte. Wie aus Fig. 3 und 4 ersichtlich ist, wird der größte Teil des möglichen Gewinns bereits bei sehr kleinen Werten von D (bis 5) erzielt.

Nachfolgend wird die Kombination von einer sphärischen Quantisierung und DPCM beschrieben.

- 15 Korrelationen zwischen den Abtastwerten $q[k]$ werden mittels differentieller PCM (DPCM) effizient ausgenutzt, siehe Fig. 5. Ein Prädiktionsfehlersignal $x[k]$ wird durch die Subtraktion von prädizierten Abtastwerten, die mittels eines linearen Prädiktorfilters $H_P(z) \cdot z^{-1}$ aus rekonstruierten Abtastwerten $\hat{q}[k]$ gewonnen werden, erzeugt. Für einen idealen Prädiktor zeigt die
20 Prädiktionsfehlersequenz $x[k]$ ein weißes Leistungsdichtespektrum (PSD) sowie minimale Varianz. Üblicherweise ist dieses Prädiktorfilter adaptiv, um sich an eine nichtstationäre Quelle anzupassen. Vorliegend werden nur Beispiele für ein festes Prädiktorfilter vorgestellt, mit dem Ziel, die Interaktion mit sphärisch logarithmischer Quantisierung möglichst einfach zu
25 beschreiben. Beispielsweise bei Audiosignalen bieten sich bereits sehr kurze, feste Prädiktionsfehlerfilter (entworfen bzgl. eines Kompromiss-Kriteriums)

üblicherweise Gewinne von mehr als 18 dB bei einer Abtastfrequenz von 44,1 kHz. Selbst segmentweise Gewinne, gemittelt über 6000 Abtastwerte (0,136s), von weniger als 15 dB lassen sich nur sehr selten beobachten, siehe hierzu Fig. 7 im Vergleich mit Fig. 3. Darüber hinaus ist der Gewinn durch adaptive Prädiktion begrenzt, falls die Signalverzögerung auf einige wenige Abtastwerte beschränkt ist und merkliche Effekte, welche durch Aktualisierungen der Koeffizienten hervorgerufen werden, vermieden werden müssen. Selbstverständlich kann das folgende Material direkt auf adaptive Prädiktion verallgemeinert werden.

Es gilt zu beachten, dass ein SNR-Gewinn, ausgedrückt durch eine Verringerung des mittleren quadratischen Fehlers zwischen originalen und rekonstruierten Abtastwerten, bei Anwendung der sogenannten Rückwärtsprädiktion, wie in Fig. 5 dargestellt, möglich ist.

Bei logarithmischer Quantisierung ist das SNR des Prädiktionsfehlersignals $x[k]$ unabhängig von seiner Varianz oder anders ausgedrückt, die Leistung des Quantisierungsgeräusches ist proportional zur Signalleistung. Somit kann der Prädiktionsgewinn, d.h. der Quotient der Varianzen von $q[k]$ und $x[k]$, direkt in einen SNR-Gewinn überführt werden. Damit ist logarithmische Quantisierung eine gute Wahl für DPCM. Hinzu kommt, dass durch DPCM - verglichen mit PCM - keine weitere systembedingte Signalverzögerung erfolgt, da ein optimales Prädiktionsfehlerfilter für maximalen Prädiktionsgewinn prinzipiell kausal und strikt minimalphasig ist (vgl. L. Pakula and S. Kay, Simple Proofs of the Minimum Phase Property of the Prediction Error Filter, *IEEE Transactions on ASSP*, vol. 31, 1983) und daher ohne strukturbedingte Verzögerung invertiert werden kann.

Nachfolgend wird das Gradientenabstiegsverfahren näher beschrieben.

Für die Anwendung von sphärisch logarithmischer Quantisierung auf DPCM mit Rückwärtsprädiktion gilt die gleiche Problematik wie für jede andere Vektorquantisierungsmethode: für die Berechnung des aktuellen

Prädiktionsfehlersignalwertes $x[k]$ müssen alle vorausgehenden rekonstruierten Abtastwerte $\hat{q}[k-i]$, $i=1,2,\dots$ vorliegen, für einen hohen Prädiktionsgewinn sind insbesondere die unmittelbar vorausgehenden Werte ($i=1, i=2$) unverzichtbar. Diese Forderung ist leider nicht vereinbar mit der

5 Quantisierung von Blöcken der Länge D Abtastwerte.

Als Lösung für dieses Problem kann jede in der Literatur erwähnte Methode zur Kombination von Vektorquantisierung mit DPCM herangezogen werden. Hier wird eine Methode, in Anlehnung an das Prinzip "analysis by synthesis", verwendet, welches beispielsweise von CELP-Wellenformcodierungs-

10 verfahren gemäß N. S. Jayant, P. Noll. Digital Coding of Waveforms. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1984 bekannt ist und kombinieren diesen Ansatz mit einem diskreten Gradientenabstiegsverfahren.

Um den Widerspruch zwischen DPCM und Vektorquantisierung zu bewältigen, wird die quadratische Euklidische Distanz zwischen Vektoren von

15 Abtastwerten

$$q[l] = (q[l \cdot D], q[l \cdot D + 1], \dots, q[l \cdot D + D - 1]) \quad (34)$$

und einem entsprechenden Rekonstruktionsvektor $\hat{q}[l]$ minimiert, $l = \lfloor k/D \rfloor$. An dieser Stelle gilt es zu beachten, dass neben der sphärisch logarithmischen Quantisierung die Berechnung des entsprechenden

20 Prädiktionsfehlersignals sowie die Inversion des Prädiktionsfehlerfilters in die Berechnung eines Paares q, \hat{q} mit einbezogen werden muss, wobei auf vorausgehende Rekonstruktionsvektoren $\hat{q}[l-m]$, $m=1,2,\dots$ zugegriffen wird, diese selbst aber unverändert bleiben. Das Ziel des Algorithmus ist es, diejenige Quantisierungszelle für $x[l]$ zu finden, für welche die Metrik

25

$$d^2(q, \hat{q}) = \sum_{i=0}^{D-1} (q[D \cdot l + i] - \hat{q}[D \cdot l + i])^2 \quad (35)$$

minimiert wird. Um einen geeigneten Startwert für den Algorithmus zu finden, schlagen wir vor, mit einer Vorwärtsprädiktion für die aktuellen D Abtastwerte zu beginnen, dies entspricht einer Deaktivierung der Kette aus ADC und DAC in Fig. 5 bzw. der direkten Einspeisung von $q[k], k = l \cdot D, l \cdot D + 1, \dots, l \cdot D + D - 1$ in das Prädiktorfilter (in Fig. 5) anstelle von $\hat{q}[k]$. Nun wird der resultierende Vektor x sphärisch logarithmisch quantisiert und dabei ein Startvektor y erzeugt, aus dem wiederum durch gewöhnliche Inversion des Prädiktionsfehlerfilters (DPCM-Empfängerstruktur) ein Vektor \hat{q} folgt. Auf diese Weise kann die Metrikberechnung für einen gegebenen quantisierten Vektor y_i erfolgen. Ausgehend von einem aktuellen Rekonstruktionsvektor y_i werden nun die Rekonstruktionsvektoren aller $2D$ nächsten Nachbarn $y_{j[i]}$ in D Dimensionen ermittelt sowie die zugehörigen Metriken gemäß (35) berechnet und miteinander verglichen. Der Vektor mit der geringsten Metrik wird für die nächste Iteration verwendet, d.h. $\arg \min_j d^2(q, \hat{q}_{j[i]})$ erzeugt eine Aktualisierung von i , wobei \hat{q}_i dem quantisierten Vektor y_i entspricht und durch Inversion des Prädiktionsfehlerfilters berechnet wird. Existiert kein solcher Vektor, so bricht der Algorithmus ab und gibt den Index des zu übertragenden Vektors y_i aus. Hier ist anzumerken, dass die Nachbarzellen üblicherweise sehr verschiedene Indizes haben und es nicht trivial ist, diese Zellen zu identifizieren. Betrachten wir beispielsweise $D = 3$, so werden die Winkel des Azimuths (φ_1) bei großen Elevationen (φ_2 nahe $\pm \pi/2$) gröber quantisiert, als bei kleinen Elevationen (φ_2 nahe 0), weil letztere einen größeren Breitenkreis auf der Kugeloberfläche besitzen. Für eine schnelle Implementierung könnten die Indizes der Nachbarzellen in einem ROM für alle Zellen gespeichert werden, solange M_φ nicht zu groß ist. Da lineare Prädiktion mit in den Optimierungsprozess einbezogen ist, ist das resultierende SNR manchmal größer als es durch die Addition der Gewinne (in dB) aus sphärisch logarithmischer Quantisierung und Prädiktion (DPCM) vorhergesagt werden kann. Besonders für den Fall kleiner Raten (z.B. $R < 5$

bit/Abtastwert) sind bemerkenswerte SNR-Gewinne beobachtbar, was nachfolgend und in Fig. 6 beschrieben wird. Ein analytisches Ergebnis für das durch diesen Algorithmus erzielbare SNR ist den Autoren derzeit nicht bekannt.

- 5 Simulationen zeigten, dass die im Mittel erforderliche Zahl an Iterationen bei ca. 0,25 (pro D Abtastwerte) liegt, und bereits bei einer Beschränkung auf max. 3 Iterationen keine signifikanten Verluste im Vergleich zu einem unbeschränkten Suchraum zu verzeichnen sind, so dass die Suche nach der optimalen Quantisierungszelle für niedrige Dimensionszahlen durchaus in
10 Echtzeit implementierbar ist. Darüber hinaus liefern bereits kleine Werte von D große Gewinne, siehe Fig. 3 und 6.

Empfangsseitig ergibt sich keinerlei Änderung gegenüber üblichen DPCM-Verfahren. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass die Gesamtverzögerung des Übertragungssystems lediglich D Abtastwerte
15 beträgt und es sich somit für Übertragungen, welche den Anforderungen einer extrem kurzen Verzögerung entsprechen müssen, hervorragend eignet.

Nachfolgend werden Varianten des Verfahrens näher beschrieben.

- Zur Beschleunigung der Suche nach der günstigsten Quantisierungszelle, die zu einer minimalen Verzerrung z.B. gemäß (35) führt, sind prinzipiell alle
20 Algorithmen der sog. Lattice-Decodierung bzw. zur Auffindung eines Maximum-Likelihood-Codeworts bei der Kanalcodierung anwendbar, vgl. z.B. Erik Agrell, Thomas Eriksson, Alexander Vardy, Kenneth Zeger. Closest Point Search in Lattices. *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 2201-2214, Aug. 2002 und die dort angegebenen Referenzen. Dabei ist vorzugsweise
25 eine Transformation dieser Verfahren in Kugelkoordinaten vorzunehmen.

Eine Variante ohne iterative Bestimmung der Quantisierungszelle ist dadurch gegeben, dass anstelle einer Berücksichtigung statistischer Abhängigkeiten innerhalb der aktuell zur Quantisierung anstehenden D Signalwerte durch ein

lineares Prädiktionsfilter gemäß Fig. 5 (also DPCM), eine nichtgleichmäßige Quantisierung der Winkelkoordinaten vorgenommen wird. Dabei sind die linearen statistischen Bindungen der aktuell zur Quantisierung anstehenden D Signalwerte zu vergangenen Signalwerten mittels klassischer DPCM mit Rückwärtsprädiktion zu nutzen. Es entsteht also eine Rückwärtsprädiktion, bei der nach D Signalwerten eine Aktualisierung des Prädiktionsfilters um D Schritte erfolgt.

Es wird vorgeschlagen, die logarithmische Quantisierung des Betrags aufrecht zu erhalten, so dass anschließend die Signalpunkte so normiert werden können, dass sie auf einer Kugel mit Radius 1 liegen. Dies erlaubt die analytische Berechnung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Signalpunkte auf der Kugeloberfläche, z.B. bei Annahme eines gauß'schen Signalprozesses aus der Autokorrelationsfunktion des Quellensignals, bzw. eine direkte experimentelle Ermittlung von relativen Häufigkeiten der Signalpunkte auf der Kugeloberfläche.

Für $M \gg 1$ lässt sich hieraus z.B. mit Hilfe des Optimierungsansatzes nach [9] eine nichtgleichmäßige kubische Quantisierung der Oberfläche einer Kugel mit Radius 1 bestimmen. Dieser Ansatz besagt, dass im Mittel der Beitrag jeder Quantisierungszelle zum Quantisierungsgeräusch gleich sein soll. Bezeichnet Δ_i die Kantenlänge einer $(D - 1)$ -dimensionalen kubischen Quantisierungszelle sowie z_i den dazugehörigen Mittelpunkt, also den empfangsseitigen Rekonstruktionsvektor mit dem Betrag 1, sowie $f(v); v := (\varphi_1, \dots, \varphi_{D-1})$ die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bzw. relative Häufigkeit von Signalwerten auf der Kugeloberfläche, so soll also näherungsweise erfüllt sein:

$$(D-1) \frac{\Delta_i^2}{12} \cdot f(z_i) \cdot \Delta_i^{D-1} = \text{const.} \quad (36)$$

mit der Nebenbedingung $\sum_{i=1}^{M\varphi} \Delta_i^{D-1} = \beta_D$ (37)

Hieraus folgt unmittelbar eine $(D-1)$ -dimensionale Kompressor-Funktion $k(v)$, durch welche die ungleichmäßige Quantisierung der Kugeloberfläche
 5 eindeutig bestimmt wird. Die ungleichmäßige Quantisierung kann dann beispielsweise wie im eindimensionalen Fall durch eine nichtlineare Verzerrung des Vektors v in einen Vektor $z := k(v)$, anschließende gleichmäßige Quantisierung zum Vektor z_i gemäß Abschnitt III-C und Anwendung der Umkehrfunktion $\hat{v} := k^{-1}(z_i)$ nachfolgend zur Gewinnung des
 10 Rekonstruktionsvektors vollzogen werden.

Vorzugsweise ist die resultierende $(D-1)$ -dimensionale Kompressorfunktion durch eine analytisch beschreibbare Funktion anzunähern, oder, analog zu der bei der eindimensionalen Kompression üblichen Darstellung mittels Geradenstücke (z.B. 13-Segment-Kennlinie, siehe [5]), durch $(D-2)$ -
 15 dimensionale Teilebenen (mit konstanten partiellen Ableitungen) zu approximieren. Bei einer über dem Raum

$$\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]^{D-2} \times [-\pi, \pi]$$

orthogonalen Rasterung dieser Approximation über den $D-1$ Winkeln kann eine einfache Auswertbarkeit der Kompressorfunktion erreicht werden.

20 Zur Simulation von sphärisch logarithmischer Quantisierung in Kombination mit DPCM wurde die Quantisierung der Ouvertüre sowie der Arie "Der Vogelfänger bin ich ja" der Oper „Zauberflöte“ von Wolfgang Amadeus Mozart (vgl. Philips Classics Productions 1994 (DDD): Mozart: "Der Vogelfänger bin ich ja" (Die Zauberflöte). Polygram Records #442569-2, Track 3) untersucht.

Fig. 6 zeigt Simulationsergebnisse für $R = 3$, $R = 4$ und $R = 7$ bit/Abtastwert bei $A = 102726$, $A = 48270$, $A = 4858$ sowie verschiedenen Dimensionszahlen D .

Das Signal wurde zuerst codiert, anschließend decodiert und das SNR durch Vergleich mit dem originalen CD-Signal berechnet. Der Störabstand ist hier jeweils über das gesamte Musikstück gemittelt. Bei den niedrigen Raten steigt das SNR mit D im Vergleich zu Fig. 3 noch steiler an, Ursache hierfür ist eine verbesserte Mittelwertbildung. Beim Vergleich der Ergebnisse sind die verschiedenen Werte des Parameters A zu beachten. Die Arie „Vogelfänger“ ist mit einem mittleren Signalpegel von -32,15 dB auf Audio-CD gespeichert und bietet aufgrund von Signaldynamik und Klangfarben (Vorspiel, Gesang, Rohrflöte) ein anspruchsvolles Beispiel zur Audiosignalcodierung. Da hier ein universelles Prädiktorfilter niedriger Ordnung ($P = 2$) verwendet wurde, können diese Simulationsergebnisse als repräsentativ für eine Vielzahl von Audiosignalen betrachtet werden.

Fig. 6 zeigt die gemessenen Störabstände, gemittelt über das ganze Musikstück. Aus einem Vergleich der Fig. 3 (oder (1)) und Fig. 6 bei $D = 1$, $R = 7$ ist offensichtlich, dass der mittlere Prädiktionsgewinn für diesen einfachen Prädiktor etwa 20 dB bis 23 dB beträgt (Abtastfrequenz: 44,1 kHz!). Bei $R = 7$ wird der Gesamtgewinn bei allen Werten von D gut durch die Summe der beiden Einzelgewinne aus sphärisch logarithmischer Quantisierung und DPCM approximiert, wobei dies bei $R = 4$ nur für $D \geq 5$ gilt. (Selbstverständlich ist (1) nicht anwendbar für beispielsweise $R = 3$ oder $R = 4$ und $D = 1$, $A = 48270$.)

Der mittlere Signalpegel der Ouvertüre liegt bei -27,20 dB; dieses Musikstück ist durch einen sehr großen Dynamikbereich von unterhalb -70 dB bis -17 dB charakterisiert, siehe auch Fig. 7. In Fig. 7 ist der segmentweise Signalpegel sowie die SNRs für das Beispiel Ouvertüre aufgetragen; jedes Segment besteht aus 6000 Abtastwerten und entspricht somit einem Zeitbereich von 0,136 s. Hier wurde sphärisch logarithmische Quantisierung in $D = 3$

Dimensionen mit $A = 1014$ und $A = 4858$ sowie in $D = 6$ Dimensionen mit $A = 48270$ und dem gleichen Kompromiss-Prädiktor der Ordnung $P = 2$ wie im ersten Beispiel angewendet. Die obere Kurve zeigt die große Dynamik, hervorgerufen durch die bekannten lauten Töne getrennt durch
5 Generalpausen über mehrere Takte zu Beginn und in der Mitte dieses populären Musikstücks. Die Kurven für $A = 1014$ und $A = 4858$ offenbaren den Vorteil eines wachsenden A bzgl. des segmentweisen SNR, man beachte hier insbesondere die Generalpausen. Die untere Kurve in Fig. 7 demonstriert diesen Aspekt für eine weitere Erhöhung von A und dem damit
10 verbundenen weiteren SNR-Gewinn von 3 dB aufgrund der höheren Dimensionszahl $D = 6$ (siehe auch Fig. 3). Es gilt zu beachten, dass trotz der niedrigen Rate von $R = 4$ bit/Abtastwert ein $10 \log_{10}(\text{SNR}) > 35\text{dB}$ (bzgl. der originalen CD) selbst in den Generalpausen aufrecht erhalten wird.

Der Wert $A = 48270$ entspricht einer Komprimierung um 12 bits, z.B. für $D =$
15 1 , $R = 12$ wird eine Auflösung von 24 bits für kleine Signalwerte erzielt. Selbstverständlich ist für $D = 1$, $R = 4$ wegen der zu geringen Intervallanzahl eine Auflösung entsprechend 16 bit niemals vorhanden. Aber bei Anwendung sphärisch logarithmischer Quantisierung in 6 Dimensionen ist der extrem
20 große Wert von $A = 48270$ für einen hohen Minimalwert des SNR tatsächlich gut gewählt. Für diesen Fall ist die Auflösung sogar identisch mit derjenigen der originalen CD-Daten für Segmente mit einem Signalpegel von -70 dB und niedriger. Bisher wurde selbst unter trainierten Personen niemand gefunden, der in der Lage war, zuverlässig einen Unterschied zwischen dem
25 quantisierten Signal bei $R = 4$, $D = 6$, $A = 48270$ und dem Originalsignal zu hören.

Vorstehend wurde ein wellenformerhaltendes Digitalisierungsverfahren für analoge Quellensignale gezeigt, das zum einen den Gewinn durch mehrdimensionale Quantisierung mit den Vorteilen der logarithmischen Quantisierung verknüpft und zum anderen in der Lage ist, den objektiven
30 Störabstand durch Addition von Prädiktionsgewinnen zusätzlich zu erhöhen. Abschließend sei angemerkt, dass sich dieses Verfahren neben einem

günstigen Austausch von Rate und Verzerrung vor allem durch einen extrem großen Dynamikbereich bei einer gleichzeitig äußerst geringen systembedingten Verzögerung des Signals um nur wenige Abtastintervalle auszeichnet.

Ansprüche

1. Verfahren zur Digitalisierung analoger Quellensignale, mit dem Schritt:
 - Durchführen einer D -dimensionalen sphärisch logarithmischen Quantisierung der analogen Quellensignale.
- 5 2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei eine Transformation der Quellensignale in Kugelkoordinaten durchgeführt wird.
- 10 3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei eine logarithmische Quantisierung des Betrages in Kugelkoordinaten erfolgt.
- 15 4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, wobei eine ungleichmäßige Quantisierung der Winkelkoordinaten der Kugelkoordinaten durchgeführt wird.
- 20 5. Verfahren nach Anspruch 1, mit den Schritten:
 - Quantisieren der analogen Quellensignale in Polarkoordinaten, wobei der Betrag der Quellensignale in Polarkoordinaten logarithmisch quantisiert wird, und wobei die Quantisierung des Winkels in Polarkoordinaten der analogen Quellensignale in Abhängigkeit der quantisierten Winkel höherer Ordnung erfolgt.
- 25 6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei die Quantisierung einer D -dimensionalen Kugel mit einem Einheitsradius durch ein Netz aus $D - 1$ -dimensionalen Würfeln erfolgt.

7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, wobei
diejenigen Quantisierungszellen ausgewählt werden, welche auf der
Oberfläche einer Kugel mit Einheitsradius liegen, wobei die
5 Quantisierungszellen $D - 1$ -dimensionale Würfel darstellen.
8. Verfahren zur Komprimierung analoger Signale, mit den Schritten:
- Durchführen einer Digitalisierung analoger Quellensignale gemäß
einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, und
 - 10 - Durchführen einer differenziellen Pulscodemodulation.
9. Verfahren nach Anspruch 8, mit den Schritten
- Durchführen einer Vorwärtsprädiktion zur Ermittlung eines
Startwertes für Abtastwerte der Quantisierung auf der Basis des
15 aktuellen Zustandes eines Prädiktorfilters,
 - Rekonstruktion der nachfolgenden D Abtastwerte,
 - Durchführen einer D -dimensionalen logarithmischen sphärischen
Quantisierung der durch die Vorwärtsprädiktion erhaltenen Werte,
um eine Startzelle zu bestimmen,
 - 20 - iteratives Durchlaufen der Prädiktion der differenziellen
Pulscodemodulation, um eine Quantisierungszelle mit dem
geringsten Quantisierungsfehler zu bestimmen.
10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, wobei
25 eine Lattice-Decodierung zur Bestimmung einer günstigen
Quantisierungszelle durchgeführt wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 10, wobei
eine Rückwärtsprädiktion einer differentiellen Pulscodemodulation
30 durchgeführt wird, wobei nach der Verarbeitung von D Abtastwerten
eine Aktualisierung des Prädiktionsfilters um D Schritte erfolgt.

12. Vorrichtung zur Digitalisierung analoger Quellensignale, mit
- einer D -dimensionalen sphärisch logarithmischen
Quantisierungseinrichtung.
- 5
13. Vorrichtung nach Anspruch 12, mit
einer Transformationseinrichtung zur Durchführung einer
Transformation der analogen Quellensignale in Kugelkoordinaten.
- 10
14. Vorrichtung nach Anspruch 12 oder 13, wobei
eine logarithmische Quantisierung des Betrages erfolgt.
- 15
15. Vorrichtung nach Anspruch 13 oder 14, wobei
eine ungleichmäßige Quantisierung der Winkelkoordinaten der
sphärischen oder Kugelkoordinaten durchgeführt wird.
16. Vorrichtung zur Komprimierung analoger Signale mit einer Vorrichtung
zur Digitalisierung analoger Signale nach einem der Ansprüche 12 bis
15, und einem Encoder für differenzielle Pulscodemodulation.
- 20
17. Vorrichtung nach Anspruch 16, mit
- einer Vorwärtsprädiktionseinrichtung zur Ermittlung eines Startwertes
für die Abtastwerte der Quantisierung auf der Basis des aktuellen
Zustandes eines Prädiktorfilters,
 - 25 - einer Rekonstruktionseinrichtung zur Rekonstruktion der
nachfolgenden D Abtastwerte,
 - einer D -dimensionalen logarithmischen sphärischen
Quantisierungseinrichtung zur Quantisierung der durch die
Vorwärtsprädiktion erhaltenen Werte, um eine Startzelle zu
bestimmen,
 - 30 - wobei die Prädiktion der differenziellen Pulscodemodulation iterativ
durchlaufen wird, um eine Quantisierungszelle mit dem geringsten
Quantisierungsfehler zu bestimmen.

18. Vorrichtung nach Anspruch 17 oder 18, wobei
eine Lattice-Decodierungseinrichtung zur Bestimmung einer
günstigen Quantisierungszelle durchgeführt wird.

5

19. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 17 bis 19, wobei
eine Rückwärtsprädiktion einer differentiellen Pulscodemodulation
durchgeführt wird, wobei nach der Verarbeitung von D Abtastwerten
eine Aktualisierung des Prädiktionsfilters um D Schritte erfolgt.

10

Zusammenfassung

Die Erfindung beruht auf dem Gedanken, ein Verfahren zur hochauflösenden, wellenformerhaltenden Digitalisierung analoger Signale vorzusehen, wobei die übliche skalare logarithmische Quantisierung auf mehrdimensionale

5 Kugelkoordinaten übertragen wird und sich somit die hieraus resultierenden Vorteile wie z.B. ein konstanter Störabstand über einen extrem hohen Dynamikbereich bei einem sehr geringen Verlust in Bezug auf die Rate-Distortion-Theorie ergeben. Um die im Quellensignal vorhandenen statistischen Abhängigkeiten für einen weiteren Störabstandsgewinn

10 ausnutzen zu können, wird die Differentielle Pulscodemodulation (DPCM) mit sphärisch logarithmischer Quantisierung kombiniert. Das resultierende Verfahren erzielt eine wirksame Datenreduktion mit einem hohen Langzeit- sowie Kurzzeitstörabstand bei extrem geringer Signalverzögerung.

15 (Fig. 4)

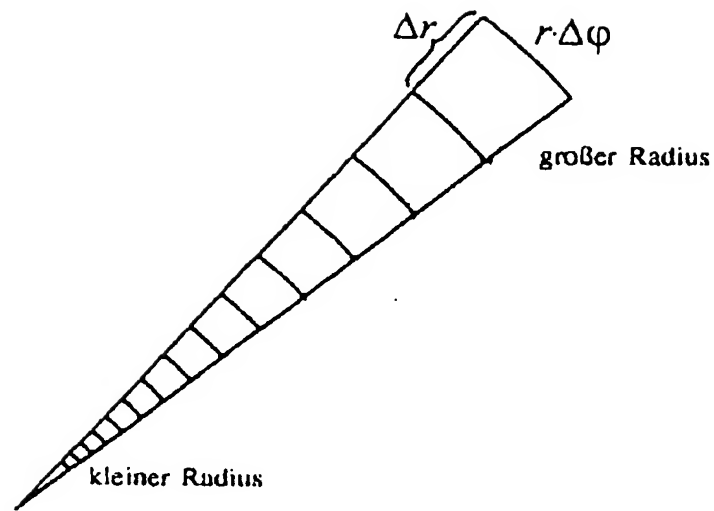


Fig. 1

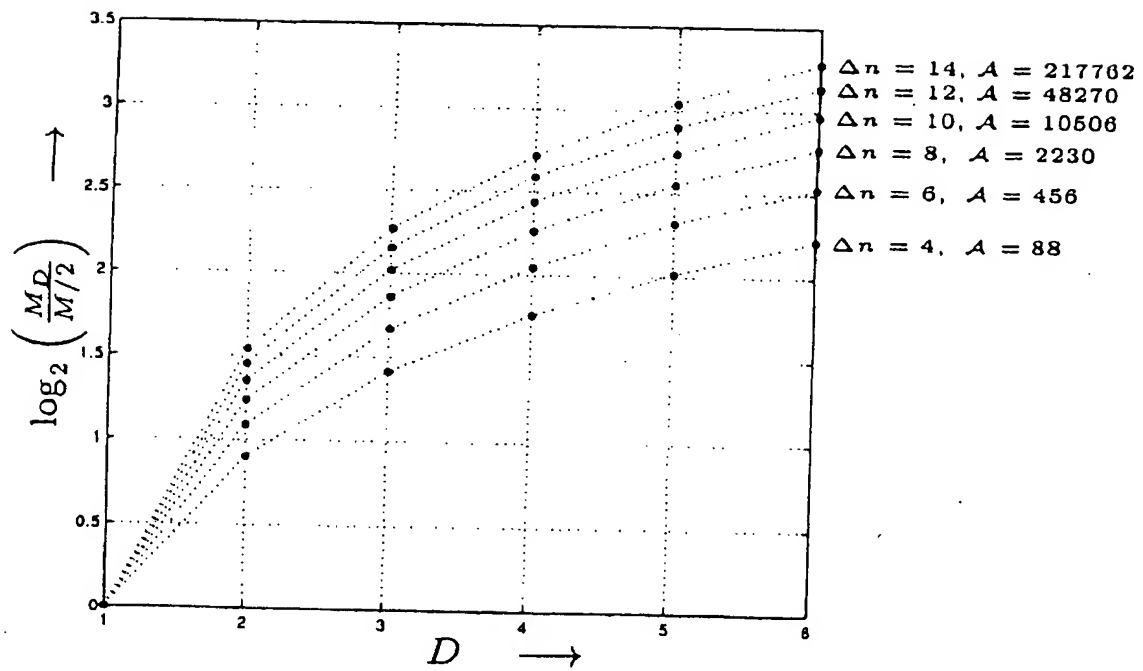


Fig. 2

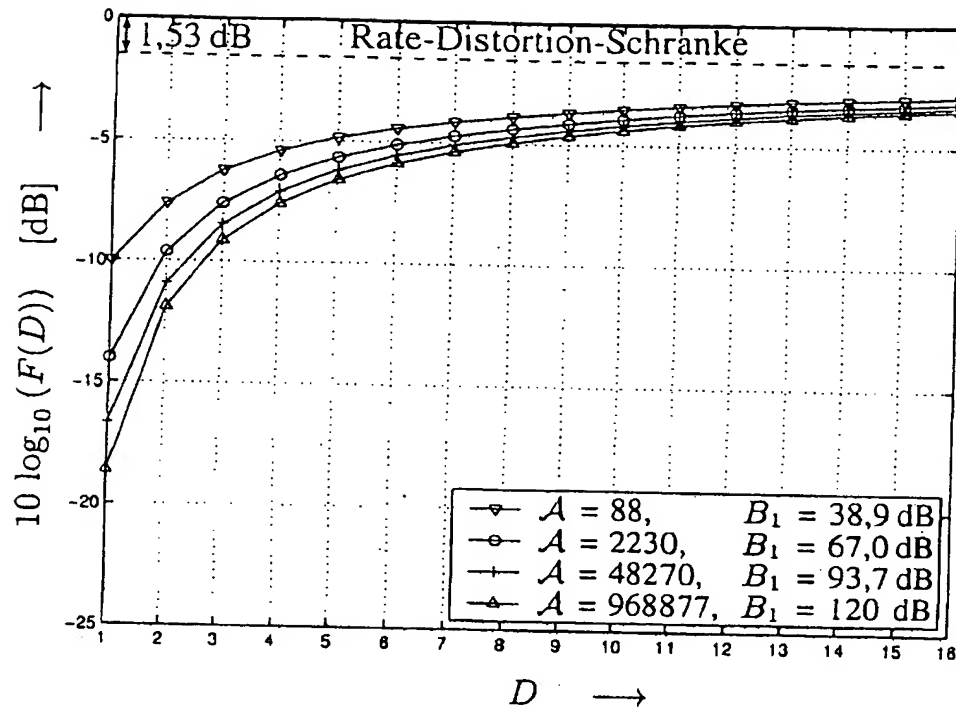


Fig. 3

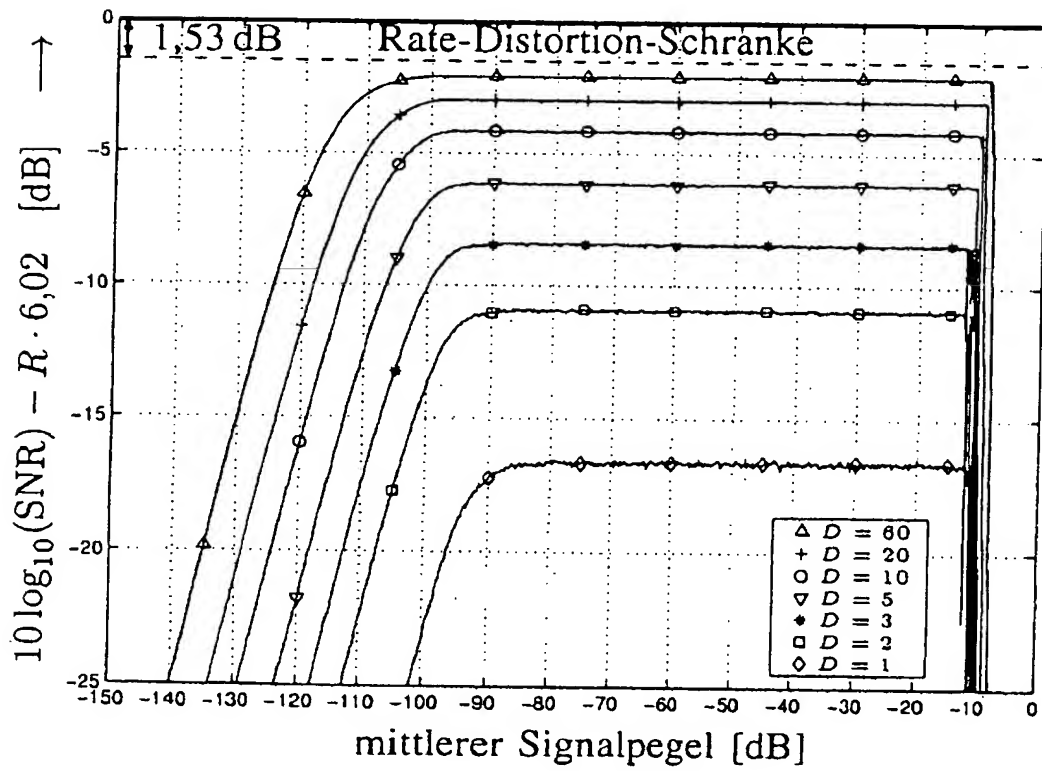


Fig. 4

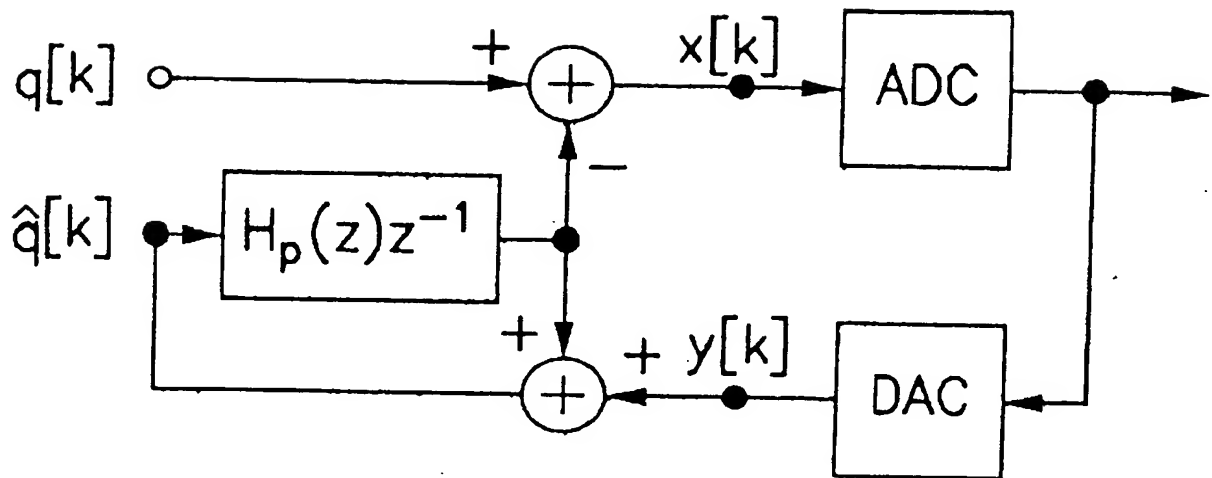


Fig. 5

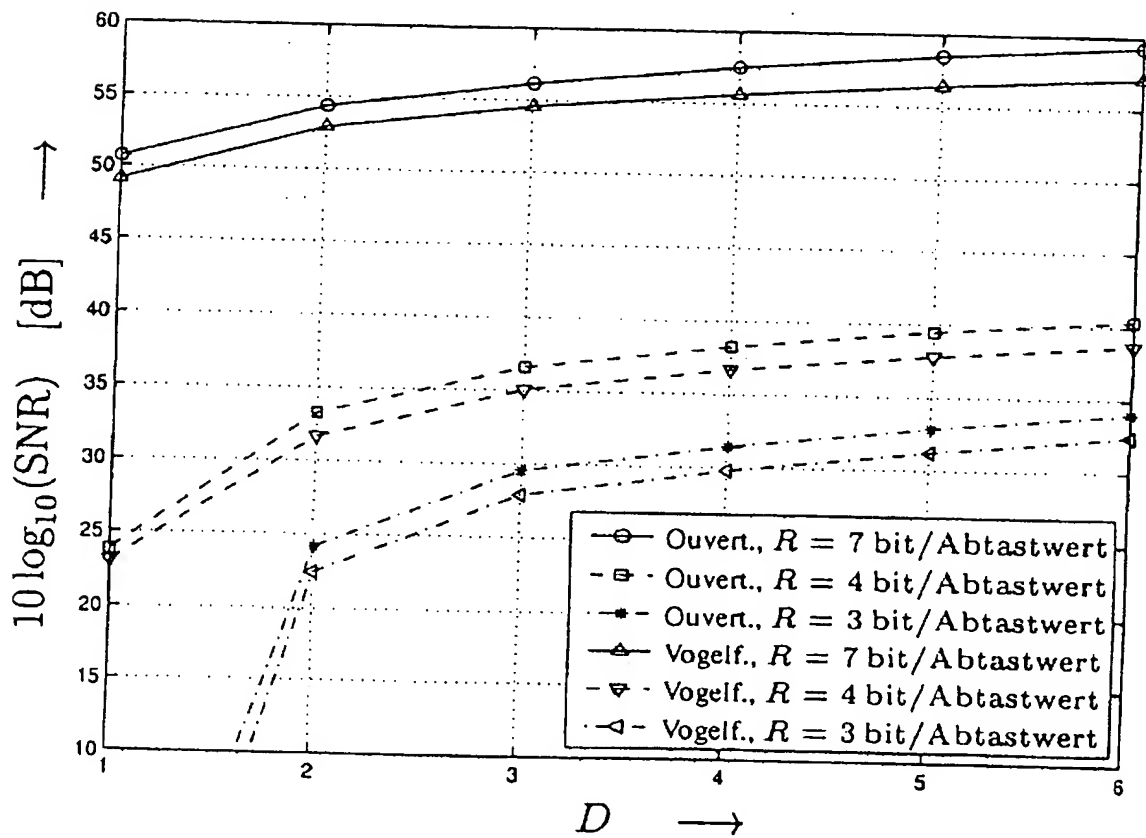


Fig. 6

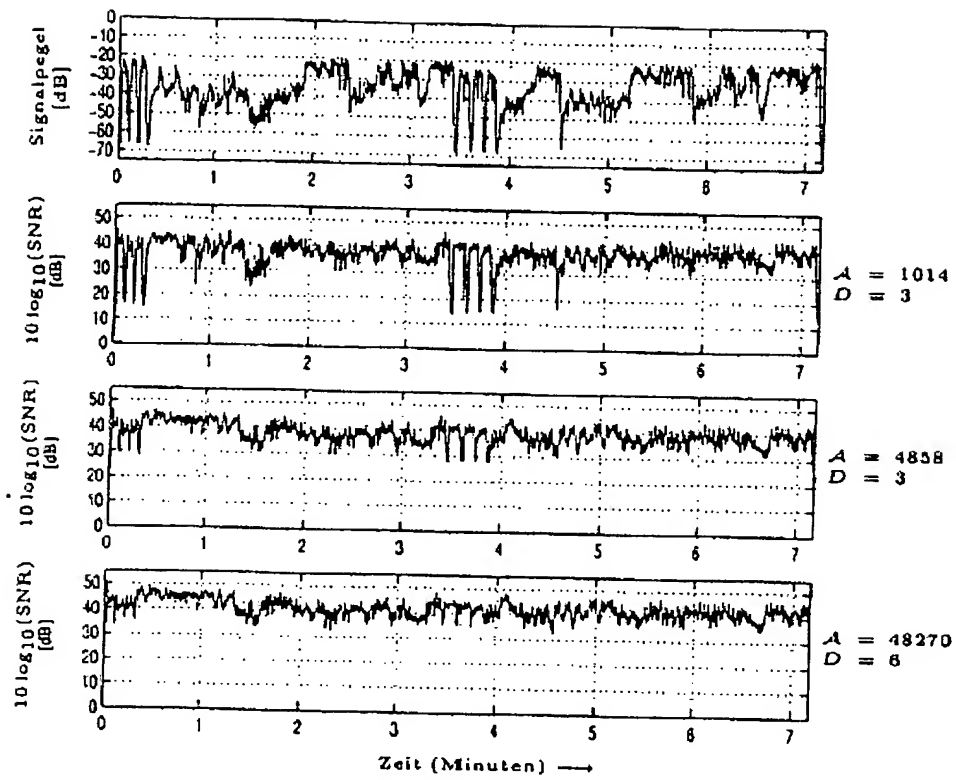


Fig. 7